Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 6, Feb.-Mar. 2022, p. 805-822

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۴۰۰، ص. ۸۲۲-۸۰۵

مقاله پژوهشی

توسعه روش روندیابی هیدرولیکی معکوس سیل در خشک‌رودها با درنظر گرفتن میزان نفوذ یا نشت

علی اصغر خسروی[1*]- عاطفه پرورش ریزی[2]- رضا براتی[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵

چکیده

در بسیاری موارد بعد از وقوع سیل به اطلاعاتی درباره مشخصات سیلاب در بالادست یک موقعیت مشخص نیاز است و ممکن است رودخانه در آن نقطه فاقد ایستگاه آب‌سنجی باشد یا داده‌برداری در زمان سیلاب انجام نشده باشد. در روندیابی معکوس، محاسبات از مقطع پایین‌دست به صورت گام به گام به سمت مقطع بالادست رودخانه صورت می‌گیرد و هیدروگراف ورودی بر اساس مشخصات هیدرولیکی رودخانه و هیدروگراف پایین‌دست تولید می‌شود. در مطالعه حاضر روندیابی معکوس هیدرولیکی سیلاب به روش‌های موج سینماتیک و موج دینامیک انجام شد؛ و اعمال مقدار نفوذ یا نشت که در خشک رودها بسیار مهم است، با جفت کردن رابطه نفوذ گرین- آمپت در معادله پیوستگی جریان انجام شده است. باوجود ماهیت ناپایدار مدل‌های روندیابی معکوس، به ویژه زمانی که عمق یا دبی اولیه جریان صفر است، با انتخاب پارامترهای وزنی مناسب ورودی به مدل، این فرایند با موفقیت انجام شد. قابلیت کاربرد مدل عددی توسعه یافته با استفاده از دو سری داده اندازه‌گیری شده و واقعی بررسی شد و نتایج نشان داد مدل عددی پیشنهادی، دبی اوج هیدروگراف ورودی یا بالادست را تا دقت ۹۹ درصد و زمان اوج را تا دقت ۹۷ درصد بازیابی نموده است. این نتایج قابلیت استفاده از مدل‌های روندیابی هیدرولیکی معکوس سیلاب در خشک‌رودها را تایید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: روندیابی معکوس، ناپایداری مدل عددی، محاسبات گام به گام، مقدار نفوذ، معادله گرین- آمپت

مقدمه

رود و بستر آن، یعنی رودخانه نقش مهمی در زندگی بشر دارند. سیلاب‌های مهیب در رودخانه‌ها، تهدیدی برای تاسیسات، مناطق شهری، صنعتی و کشاورزی مجاور آن محسوب می‌شود و سالانه باعث ایجاد تلفات جانی و خسارات مالی فراوان می‌شود.

برای جلوگیری و یا کاهش آثار مخرب سیل، شناخت ویژگی‌های سیل شامل ارتفاع آب و دبی متناظر با آن به‌ویژه دبی اوج سیلاب با استفاده از روش‌های روندیابی حائز اهمیت است. روندیابی سیلاب از دو دیدگاه هیدرولوژیکی و هیدرولیکی قابل مطالعه است. روش‌های هیدرولیکی بر اصول تئوری جریان‌های غیردائمی در آبراهه روباز و حل معادله دیفرانسیل مربوطه استوارند. جواب‌های حاصل از این روش‌ها دقیق ولی روابط پیچیده و استفاده از آن‌ها مشکل است. در روش‌های هیدرولوژیکی، اصل پیوستگی جریان و رابطه بین دبی و ذخیره آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مساله سبب می‌شود استفاده از این روش‌ها نسبت به روش‌های هیدرولیکی، حل مسائل روندیابی را به میزان قابل ملاحظه‌ای ساده نماید، ولی جواب‌های به دست آمده دارای دقت کمتری نسبت به روش‌های هیدرولیکی هستند (۱۰ و ۱۸).

تعیین هیدروگراف مقطع پایین‌دست با استفاده از هیدروگراف ورودی یا بالادست، روندیابی (یا روندیابی مستقیم سیلاب) نامیده می‌شود. در روندیابی معکوس، محاسبات از مقطع پایین‌دست به صورت گام به گام به سمت بالادست مسیر جریان آب انجام می‌شود و هیدروگراف ورودی (در بالادست یک بازه) با توجه به مشخصات

---

۱ و ۲- به‌ترتیب کاندیدای دکتری سازه‌های آبی و دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران
(*- نویسنده مسئول: Email: Ali.a.khosravi@ut.ac.ir)
۳- دکتری در مهندسی عمران، رئیس گروه تحقیقات کاربردی، شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی

DOI: 10.22067/JSW.2022.73670.1116

هیدرولیکی رودخانه و هیدروگراف در پایین‌دست تعیین می‌شود (۱۳).

در برخی موارد، بعد از گذر سیل مخرب، به اطلاعاتی درباره مشخصات سیلاب رخ داده در نقطه بالادست یک ایستگاه هیدرومتری نیاز است و ممکن است رودخانه در آن نقطه فاقد ایستگاه هیدرومتری باشد و یا داده‌برداری در زمان سیل اتفاق نیفتاده باشد. هدف از روندیابی معکوس بعد از مشخص کردن دبی یا تراز سطح آب سیلاب در بالادست، برآورد ابعاد مناسب سازه‌های مرتبط با مهندسی رودخانه‌ها (دیواره‌های حفاظتی، آبشکن‌ها و سرریزها) در آن نقطه است. از دیگر موارد کاربرد روندیابی معکوس می‌توان به واسنجی ایستگاه‌های هیدرومتری احداث شده در بالادست اشاره کرد (۲). روندیابی معکوس در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از دریچه‌های تخلیه مخازن و سدهای مخزنی در مواقع سیلاب، برای جلوگیری از خسارت به مناطق پایین‌دست نیز قابل استفاده است (۱۲).

نتایج بررسی مطالعات انجام شده در زمینه روندیابی معکوس سیلاب بیانگر این موضوع است که روش‌های هیدرولیکی که به حل معادله سنت- ونانت می‌پردازند و در صدر آن‌ها روش موج دینامیکی، نتایج دقیق‌تری را در روندیابی معکوس سیلاب ارائه می‌دهند (۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲).

همچنین با توجه به دشواری کاربرد روش‌های هیدرولیکی در روندیابی معکوس سیلاب، محققان مختلف از روش‌های ساده‌تر استفاده کرده‌اند که هم به لحاظ زمان و هم به لحاظ هزینه به صرفه‌ترند و دقت قابل قبولی دارند. مدل خطی و یا غیرخطی ماسکینگام و الگوریتم ژنتیک از جمله روش‌های به کار رفته در تحقیقات گذشته هستند.

داس (۱۱) از مدل ماسکینگام برای روندیابی معکوس سیلاب استفاده کرد. در این تحقیق، روشی برای تعیین پارامترهای معادلات ماسکینگام ارائه شد که برای حل غیرخطی معادلات روندیابی معکوس کاربرد داشت. نتایج نشان داد که برای روندیابی معکوس جریان، انجام واسنجی پارامترهای مدل الزامی است.

کوسیس و همکاران (۱۹) به بررسی روندیابی معکوس سیلاب با هدف روندیابی جریان ورودی از روی هیدروگراف خروجی یا پایین‌دست با استفاده از روش ماسکینگام پرداختند و نتیجه را با حل معکوس معادلات سنت- ونانت مقایسه کردند. نتایج آن‌ها دقت قابل قبول روش ماسکینگام را نسبت به روندیابی هیدرولیکی معکوس سیلاب نشان داد.

بادفر و همکاران (۲) عملکرد مدل ماسکینگام خطی و غیرخطی را در روندیابی معکوس هیدرولوژیکی سیلاب از طریق حل تابع ذخیره به روش اویلر و رانج کوتای مرتبه چهار مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای روندیابی سیل با استفاده از الگوریتم رقابت تکاملی جوامع (SCE) بهینه گردید. نتایج تحقیق آن‌ها در بازیابی هیدروگراف مقطع بالادست جریان دقتی بالغ بر ۸۲ درصد را در شرایط استفاده از داده‌های واقعی نشان داد که بیان‌گر قابلیت کاربرد مدل ارائه شده در شرایط واقعی جریان‌های رودخانه‌ای می‌باشد.

در هنگام وقوع سیل در رودخانه‌ها، در اثر تبخیر و نفوذ از بستر و کناره‌ها، حجم سیلاب به مرور کاهش می‌یابد. این کاهش حجم سیلاب، که تلفات انتقال نامیده می‌شود، در مناطق خشک قابل توجه بوده و در برخی از مطالعات مقدار آن تا ۳۰ درصد حجم سیلاب ورودی به بازه گزارش شده است (۶). از این‌رو مدل‌های توسعه یافته برای روندیابی سیلاب در رودخانه‌های فصلی و رودخانه‌های جاری در مناطق خشک و نیمه خشک باید بتوانند برآوردی مناسب از تلفات انتقال ارائه دهند، چرا که تعیین مقدار تلفات انتقال اطلاعات مفیدی در خصوص رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی به‌دست می‌دهد. مورین و همکاران (۲۳) با انجام روندیابی سیلاب و با استفاده از داده‌های مشاهداتی سیلاب های رودخانه کوسیب در کشور نامیبیا که در منطقه بسیار خشک آفریقا واقع شده است بیان داشتند سیلاب‌های با حجم جریان متوسط تا بزرگ نقش مهمی در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی داشته که مقدار نشت در بسترهای با نفوذپذیری بالا و مجاری آبی طولانی و عریض محسوس‌تر است. شدت نفوذ در برخی وقایع سیلاب به حدی بود که در عمل هیچ‌گونه جریانی به مقاطع پایین‌دست رودخانه نمی‌رسید.

اگر چه اهمیت تلفات انتقال در مناطق خشک از سالیان دور مورد توجه بوده است، اما اطلاعات چندانی از فرآیند حاکم بر شکل‌گیری این تلفات در دست نیست. به علاوه، وجود این رودخانه‌ها در مناطق خشک و محروم که اغلب فاقد ایستگاه های اندازه گیری می‌باشند، برآورد تلفات انتقال در این مناطق را دشوار می‌نماید (۴).

در کشور ما ایران، حدود ۳۹ درصد یعنی ۲۶,۰۰۰ کیلومتر از طول رودخانه‌های اصلی و مهم را رودخانه‌های فصلی و خشک تشکیل داده‌اند ولی متاسفانه مطالعات محدودی درخصوص برآورد میزان نفوذ از بدنه رودخانه در حین عبور جریان سیل انجام شده است. همچنین این بررسی‌ها میزان نفوذ را تنها در روندیابی مستقیم جریان تخمین زده‌اند. لذا در رودخانه‌های فصلی و خشک که معمولاً فاقد ایستگاه هیدرومتری می‌باشند، ضروری است جهت بررسی چگونگی طغیان یا فروکش کردن سیلاب، میزان نفوذ از بدنه رودخانه نیز در فرآیند روندیابی معکوس وارد شود تا بتوان با انجام محاسبات هیدرولیکی دقیق‌تر، تراز آب یا دبی جریان را در نقاط موردنیاز به‌دست آورد.

در فرآیند روندیابی، معادلات حاکم با رابطه‌ای برای منظور کردن میزان نفوذ یا نشت به بستر رودخانه یا مسیل، ترکیب می‌شوند. سپس با روندیابی سیلاب در طول بازه و بررسی هیدروگراف‌های حاصل در نقاط مختلف، میزان نشت مشخص می‌شود (۸).

بهرامی و همکاران (۳) به مدل‌سازی عددی نحوه پیشروی آب در جویچه‌های زراعی با روش روندیابی جریان و با مدل ماسکینگام- کونژ پرداختند که در آن معادله نفوذ لوئیس- کوستیاکف جهت برآورد

میزان نفوذ استفاده شده بود. آن‌ها با مقایسه نتایج مدل عددی خود با خروجی نتایج نرم افزار SIRMOD که روندیابی سیلاب را به روش‌های سینماتیک، اینرسی صفر و هیدرودینامیک مدل می‌کند، بیان کردند دقت روش ماسکینگام- کونژ به‌ویژه در جویچه‌های کوتاه و دبی ورودی بزرگ‌تر، بیش‌تر است.

قبادیان و خلج (۱۶) مدلی عددی ارائه کردند که در آن معادلات سنت-ونانت با روش تفاضل‌های محدود حل شد. رابطه نشت موسکات به گونه‌ای در معادلات مذکور گنجانده شده تا به طور همزمان نشت در مسیر جریان را نیز محاسبه کند. مدل ارائه شده با دقت مطلوبی هیدروگراف خروجی از بازه رودخانه زنگمار را پیش‌بینی نمود. محمدی و قبادیان (۲۱) مدل عددی را جهت تخمین مقدار نشت در رودخانه‌ها تهیه کردند که برای برآورد نشت، رابطه گرین- آمپت در مدل مذکور با معادلات جریان غیرماندگار ترکیب شد. در مدل مذکور، مقدار نفوذ در بازه‌ای از رودخانه قره‌سو در حدود سه درصد از حجم سیلاب ورودی به آن برآورد شد.

نوردونین و همکاران (۲۴) تقریب موج پخشیدگی معادلات سنت- ونانت در روندیابی را با معادله نفوذ فیلیپ و جریان آب زیرزمینی ترکیب نمودند. خروجی مدل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی، چشم- انداز امیدوارکننده را برای محاسبه مقدار نشت در جریان‌های ماندگار و غیرماندگار نشان داد. چنگ و همکاران (۹) یک مدل روندیابی سیلاب شامل نفوذ از کف کانال را پیشنهاد کردند. در این مدل، یک روش شبیه‌سازی نفوذ از کف براساس تئوری نفوذ هورتون، توسعه داده شد. روش ماسکینگام-کونژ با جریان نفوذی از کف به عنوان خروجی جانبی، برای روندیابی سیلاب مورد استفاده قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که دقت این مدل بالاست و علاوه بر ساده بودن، برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی سیلاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب است.

محمدی و همکاران (۲۲) برای تخمین میزان نفوذ، مدلی عددی برای مقاطع نامنظم رودخانه‌ای تهیه کردند. در این مدل برای برآورد نفوذ، رابطه گرین-آمپت با معادله‌های جریان غیرماندگار جفت شد. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که وقتی از رابطه گرین-آمپت برای محاسبه نفوذ استفاده می‌شود، مقدار عمق نفوذ تجمعی و شدت نفوذ در هر یک از مقاطع در طول مسیر رودخانه قابل محاسبه و برآورد است. نویسندگان پس از مقایسه نتایج این مطالعه با تحقیقات قبلی بیان نمودند رابطه گرین- آمپت برای تخمین مقدار نفوذ یا نشت نسبت به روابط دیگر از دقت بالاتری برخوردار است. پاتوواری و سارما (۲۵) یک مدل هیدرودینامیکی اصلاح شده جدید را با قابلیت تعیین دقیق مشخصات جریان در مناطق با نفوذپذیری بالا پیشنهاد کردند. این مدل با استفاده از معادلات جریان غیرماندگار، در ترکیب با معادله نفوذ گرین-آمپت به عنوان معادله حاکم، توسعه داده شد. برای حل معادلات حاکم، روش تفاضل محدود ضمنی به کار رفت.

در مطالعه حاضر که به روندیابی معکوس هیدرولیکی سیلاب در مناطق خشک می‌پردازد، نفوذ در طول مسیر رودخانه نیز توسط رابطه گرین-آمپت در مدل عددی تهیه شده، وارد شده است تا بتواند روندیابی معکوس را با دقت مناسب و در شرایط هیدرولیکی مسیل‌ها و خشک‌رودها انجام دهد. بر اساس بررسی‌های انجام شده، تاکنون هیچ پژوهشگری مقدار نفوذ را در روندیابی معکوس هیدرولیکی سیلاب مورد بررسی و تحلیل قرار نداده است و تنها توکلی و همکاران (۲۷) با موفقیت توانستند روندیابی معکوس خشک‌رودها را در حضور نشت یا نفوذ و به روش هیدرولوژیکی ماسکینگام غیرخطی به انجام رسانند.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

حرکت موج سیلاب در رودخانه‌ها از نوع جریان غیرماندگار متغیر تدریجی می‌باشد. در جریان‌های متغیر تدریجی شتاب قائم ناچیز و قابل صرفنظر کردن بوده، ولی اثر اصطکاک کانال قابل ملاحظه است و می‌بایست در محاسبات مدنظر قرار گیرد. معادله‌های حاکم بر جریان‌های غیرماندگار متغیر تدریجی به معادله‌های سنت-ونانت معروف می‌باشند که شامل معادله پیوستگی و معادله اندازه حرکت بوده و به‌صورت روابط زیر خلاصه می‌شوند (۱):

(۱) پیوستگی:

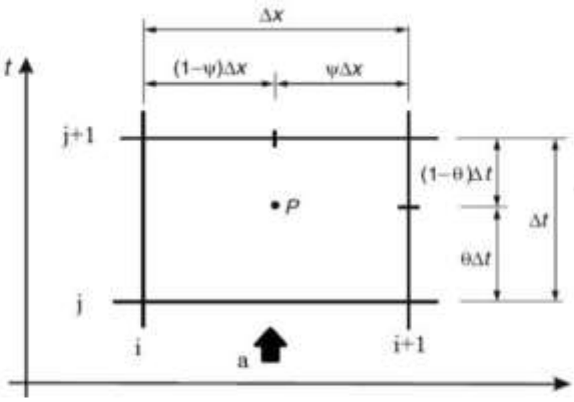
$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}-q_L=0$$

(۲) اندازه حرکت:

$$\frac{1}{A}\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right)+g\frac{\partial y}{\partial x}-g\left(s_0-s_f\right)=0$$

که در آن‌ها Q دبی جریان، A سطح مقطع عرضی آبراهه، q_L جریان جانبی ورودی، g شتاب گرانش، S_0 شیب بستر و S_f شیب خط انرژی ناشی از مقاومت جریان است.

در تمام مدل‌های روندیابی هیدرولیکی جریان از شکل کامل معادله پیوستگی استفاده می‌شود، اما معادله اندازه حرکت در شکل‌های مختلفی که از حذف برخی اجزای آن به‌دست می‌آیند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساده‌ترین مدل روندیابی هیدرولیکی، مدل موج سینماتیک است که در آن از اجزای مربوط به شتاب موضعی، شتاب انتقالی و نیروی فشاری در معادله اندازه حرکت صرف نظر می‌شود. یعنی فرض می‌شود $S_0=S_f$ که بدین معنا است که نیروهای اصطکاکی و گرانشی با هم در تعادل هستند. در مدل موج پخشیدگی از اجزای مربوط به شتاب موضعی و انتقالی صرف نظر شده اما نیروی فشاری در آن لحاظ می‌شود.



شکل ۱- شمای چهار نقطه‌ای با $\varphi=0.5$ (روش پرایسمن)

Figure 1- Four-point scheme with $\varphi=0.5$ (Preissmann method)

و در نهایت در مدل موج دینامیکی معادله اندازه حرکت به‌طور کامل و بدون ساده‌سازی در نظر گرفته می‌شود. به علت وجود اجزای غیرخطی در معادلات سنت–ونانت، راه حل تحلیلی برای این معادلات، به جز در مواردی که معادلات ساده شده‌اند، وجود ندارد. لذا برای حل این معادلات باید از روش‌های عددی استفاده نمود. در این تحقیق از روش تفاضلات محدود، که روش غالب برای حل عددی معادلات جریان غیر ماندگار یک بعدی است، برای حل معادلات غیرخطی سنت–ونانت استفاده خواهد شد. پرکاربردترین و قوی‌ترین روش به تایید عموم، شمای تفاضلی ضمنی چهار نقطه‌ای یا همان شمای پرایسمن است. از دلایل کاربرد گسترده این روش می‌توان به محاسبه همزمان دبی و عمق جریان در هر گره محاسباتی، امکان انتخاب گام زمانی بزرگتر و ضمنی و پایدار بودن روش اشاره نمود (۳۰).

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، دامنه حل در شمای پرایسمن از شبکه‌ای به ابعاد $\Delta x_i \times \Delta t\ (i=1,2,\dots,N)$ تشکیل شده است. تقریب مشتق زمانی و مکانی در نقطه p که در وسط بازه طولی Δx_i است، انجام می‌گیرد. این نقطه تنها می‌تواند در امتداد محور t یا زمان توسط تغییر مقدار ضریب وزن‌دهنده θ جابجا گردد.

اگر f یک متغیر وابسته مانند دبی جریان یا عمق جریان باشد، مقدار متغیر و مشتق‌های زمانی و مکانی آن بر اساس شمای چهار نقطه‌ای یا جعبه‌ای پرایسمن از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx (1-\varphi)\frac{f_{i+1}^{j+1}-f_{i+1}^{j}}{\Delta t}+\varphi\frac{f_{i}^{j+1}-f_{i}^{j}}{\Delta t} \quad (0\le\varphi\le 1) \tag{۳}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx (1-\theta)\frac{f_{i+1}^{j}-f_{i}^{j}}{\Delta x}+\theta\frac{f_{i+1}^{j+1}-f_{i}^{j+1}}{\Delta x} \quad (0\le\theta\le 1) \tag{۴}$$

$$f_p=\varphi\left[\theta u_i^{j+1}+(1-\theta)u_i^j\right]+(1-\varphi)\times\left[\theta u_{i+1}^{j+1}+(1-\theta)u_{i+1}^j\right] \tag{۵}$$

فرد (۱۵) نشان داد که در حالت $0.5\le\theta\le 1.0$ شمای مذکور برای هر بازه زمانی به‌طور غیرمشروط پایدار است و مقادیر ۰/۵۵ تا ۰/۶ را برای آن پیشنهاد کرد. با جای‌گذاری ترم‌های تفاضل محدود حاصل از روابط بالا در روابط ۱ و ۲ و بعد از ساده‌سازی، معادله پیوستگی و اندازه حرکت گسسته‌سازی می‌شوند.

روندیابی معکوس به روش موج سینماتیکی

همانطور که ذکر شد در مدل موج سینماتیکی گرادیان فشار و شتاب در مقایسه با ترم شیب کف کانال ناچیز است و نیروهای اصطکاکی و ثقلی با یکدیگر در تعادل‌اند، پس حرکت موج را بیشتر با معادله پیوستگی توضیح می‌دهند (۱۰).

مدل موج سینماتیک به حل تقریبی معادلات سنت–ونانت می‌پردازد و به علت عدم نیاز به شرایط مرزی پایین‌دست بسیار پرکاربرد است. از آن‌جا که در این روش معادله پیوستگی به‌طور کامل استفاده می‌شود، لذا معادله اندازه حرکت یعنی رابطه ۲ به‌صورت رابطه زیر خلاصه می‌شود:

$$S_0=S_f \tag{۶}$$

رابطه فوق را برای استفاده در معادلات تفاضلات محدود می‌توان به فرم زیر بازآرایی نمود:

$$A=\alpha Q^{\beta} \tag{۷}$$

که ضرایب α و β با توجه به معادله جریان مورد استفاده قابل استخراج است. در صورت به کارگیری رابطه مانینگ در محاسبات مقدار $\beta=3/5$ و α برابر خواهد بود با:

$$\alpha=\left(\frac{nP^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{S_0}}\right)^{\frac{3}{5}} \qquad (۸)$$

متغیر A یا سطح مقطع جریان را می‌توان با مشتق‌گیری از رابطه ۷ حذف کرد:

$$\frac{\partial A}{\partial t}=\alpha\beta Q^{\beta-1}\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right) \qquad (۹)$$

و رابطه بالا را در رابطه پیوستگی جای‌گزین نموده تا معادله موج سینماتیک ناشی از تغییرات Q به‌دست آید:

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\alpha\beta Q^{\beta-1}\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)=q_L \qquad (۱۰)$$

معادله بالا را می‌توان خلاصه‌تر نیز نوشت:

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{1}{C_k}\frac{\partial Q}{\partial t}=q_L \qquad (۱۱)$$

که:

$$C_k=\frac{1}{\alpha\beta Q^{\beta-1}} \qquad (۱۲)$$

سرعت موج سینماتیک است. با جای‌گذاری مشتقات مکانی و زمانی حاصل از شمای پرایسمن یعنی روابط ۳ تا ۵ در معادله ۱۱ خواهیم داشت:

$$\theta\frac{Q_{i+1}^{j+1}-Q_i^{j+1}}{\Delta x}+(1-\theta)\frac{Q_{i+1}^{j}-Q_i^{j}}{\Delta x}+\frac{1}{C_k}\times\left(\varphi\frac{Q_i^{j+1}-Q_i^{j}}{\Delta t}+(1-\varphi)\frac{Q_{i+1}^{j+1}-Q_{i+1}^{j}}{\Delta t}\right)+q_L=0 \qquad (۱۳)$$

و رابطه بالا را بر حسب مقدار مجهول در حل معکوس یعنی Q_i^j، به‌دست می‌آوریم:

$$Q_i^j=\frac{-A}{B}Q_i^{j+1}+\frac{1}{B}Q_{i+1}^{j+1}-\frac{C}{B}Q_{i+1}^{j}+\frac{q_L}{D} \qquad (۱۴)$$

که ضرایب موجود در آن از روابط:

$$A=\left(\frac{\frac{\theta}{\Delta x}-\frac{\varphi}{C_k\Delta t}}{\frac{\theta}{\Delta x}+\frac{1-\varphi}{C_k\Delta t}}\right) \qquad (۱۵)$$

$$B=\left(\frac{\frac{1-\theta}{\Delta x}+\frac{\varphi}{C_k\Delta t}}{\frac{\theta}{\Delta x}+\frac{1-\varphi}{C_k\Delta t}}\right) \qquad (۱۶)$$

$$C=\left(\frac{\frac{1-\varphi}{C_k\Delta t}+\frac{1-\theta}{\Delta x}}{\frac{\theta}{\Delta x}+\frac{1-\varphi}{C_k\Delta t}}\right) \qquad (۱۷)$$

$$D=\left(\frac{1-\theta}{\Delta x}+\frac{\varphi}{C_k\Delta t}\right) \qquad (۱۸)$$

به‌دست می‌آیند. در استخراج معادله ۱۴ علامت عبارت q_L نسبت به معادله پیوستگی اصلی تغییر یافته است. زیرا عبارت q_L در مدل روندیابی خشک‌رودها، نشت یا نفوذ به بستر رودخانه را نشان می‌دهد و باید آن را با علامت منفی در معادله پیوستگی وارد نمود.

روندیابی معکوس به روش موج دینامیکی

در روندیابی موج دینامیکی هیچ‌گونه ساده‌سازی در معادله اندازه حرکت صورت نمی‌گیرد و معادلات سنت-ونانت به‌طور کامل حل می‌شوند.

در روندیابی مستقیم، با گسسته‌سازی معادلات پیوستگی و اندازه حرکت با استفاده از تقریب‌های مربوط به مشتقات مکانی و زمانی شمای پرایسمن و اعمال معادلات در جهت محور مکانی برای هر یک از *N-1* المان مستطیلی (مطابق با شکل ۲)، بین محور مکانی *i=1* و *i=N*، تعداد *(2N-2)* معادله به‌وجود می‌آید درحالی که تعداد مجهولات در هر گام زمانی *2N* است. دو معادله اضافی مورد نیاز برای تکمیل معادلات موجود برای حل مسئله، توسط دو شرط مرزی یکی در انتهای بالادست و یکی در انتهای پایین دست بازه رودخانه یعنی در *x=0* و *x=N* تامین می‌شوند. شرط مرزی بالادست را می‌توان هیدروگراف ورودی یا تراز سطح آب اندازه‌گیری شده و شرط مرزی پایین دست را شرایط جریان نرمال، جریان بحرانی و یا رابطه دبی اشل تعیین نمود. همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است محاسبات از زمان اولیه یعنی *t=0* شروع شده و در جهت افزایش گام زمانی تا زمان *t=T* ادامه می‌یابد. مجهولات در شمای چهار نقطه‌ای پرایسمن دبی و تراز سطح آب در گام زمانی مجهول یعنی Q_i^{j+1}، Q_{i+1}^{j+1}، y_i^{j+1} و y_{i+1}^{j+1} هستند.

در روندیابی معکوس که هدف تحقیق حاضر است با به کار بردن معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در جهت محور زمانی برای هر یک از *M-1* المان مستطیلی (مطابق با شکل ۳)، بین محور زمانی *j=1* تا *j=M*، تعداد *(2M-2)* معادله به‌وجود می‌آید ولی تعداد مجهولات در هر گام مکانی *2M* است. دو معادله اضافی مورد نیاز برای تکمیل معادلات موجود برای حل مسئله، توسط شرایط مرزی در *t=0* و *t=T* تامین می‌شوند:

(۱۹) جریان یکنواخت قبل سیلاب $Q(x,t)=Q_o(t)$
(شرط مرزی در $0\le x\le L$, $t=0$) یا $h(x,t)=h_o(t)$

$$Q(x,t)=Q_f(t)$$

(۲۰) جریان یکنواخت بعد سیلاب یا $h(x,t)=h_f(t)$

(شرط مرزی در $t=T$ $0 \le x \le L$),

(۲۱) هیدروگراف و تراز آب مقطع پایین‌دست $Q(L,t)=Q(t)$ و $h(L,t)=h(t)$ (شرط اولیه در $x=L$, $0 \le t \le T$)

در روندیابی معکوس، محاسبات از انتهای پایین دست یعنی $x=L$ شروع شده و تا ابتدای بالادست مجرا یعنی تا $x=0$ ادامه می‌یابد. مجهولات در اینجا Q_i^{j+1}، Q_i^j، y_i^{j+1} و y_i^j هستند.

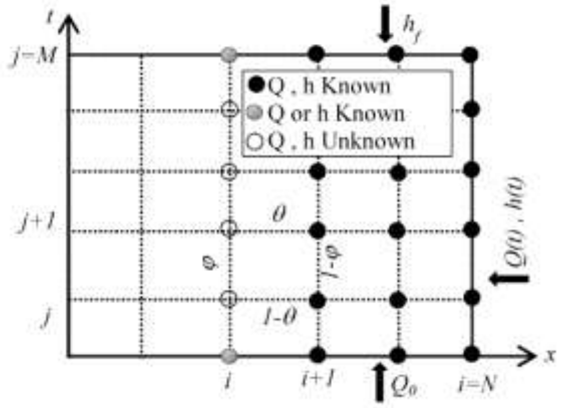
شایان ذکر است گسسته سازی معادلات سنت-ونانت در هر گام مکانی منتهی به دستگاه معادلات $2M$ معادله و $2M$ مجهول می‌شود که از روش‌های تکراری مانند روش نیوتن- رافسون قابل حل است.

مقدار نفوذ حین انتقال جریان در خشک‌رودها

همان‌طور که ذکر شد، در روندیابی هیدرولیکی سیلاب در خشک‌رودها که با لحاظ نمودن همزمان مقدار نفوذ یا نشت در بستر رودخانه است، معادلات سنت-ونانت باید با ترکیب معادله‌ای که نشت را برآورد می‌کند به‌طور همزمان حل شوند.

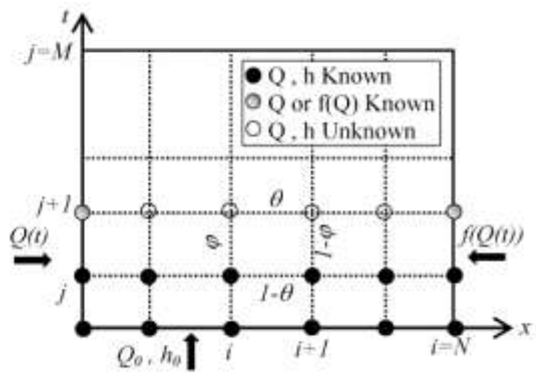
به منظور برآورد میزان نشت می‌توان از روابط متعددی که توسط محققان مختلف پیشنهاد شده است، استفاده نمود. این روابط جهت محاسبه دبی نفوذ به بستر کانال‌های خاکی یا محاسبه نرخ نفوذ از سطح زمین ارائه شده‌اند.

به‌طور کلی مدل نفوذ انتخابی بهتر است علاوه بر درنظر گرفتن شرایط غیر اشباع ناحیه بین بستر و سطح آب زیرزمینی، تغییرات غیر ماندگار عمق جریان بر روی میزان نفوذ را نیز لحاظ نماید شرایطی که در واقعیت در رودخانه‌های مناطق خشک اتفاق می‌افتد. لذا در این تحقیق از روش گرین- آمپت برای محاسبه نشت استفاده شده است.



شکل ۲- شبکه محاسباتی اختلافات محدود ضمنی در روندیابی مستقیم سیلاب

Figure 2- Implicit finite difference computational network in direct flood routing



شکل ۳- شبکه محاسباتی اختلافات محدود ضمنی در روندیابی معکوس سیلاب

Figure 3- Implicit finite difference computational network in reverse flood routing

در این روش نرخ نفوذ با گذشت زمان بر حسب پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع، مکش و درصد رطوبت در جبهه مرطوب پیش‌بینی می‌شود. ضمن آن‌که ارتفاع آب جمع شده بر روی سطح زمین نیز در محاسبه نفوذ تاثیر می‌گذارد. روش گرین-آمپت بر مبنای توسعه یک تئوری فیزیکی تقریبی است که راه حل دقیقی دارد. گرین و آمپت تصویر ساده شده نفوذ را به صورت شکل ۴ پیشنهاد کردند. در این شکل جبهه مرطوب یک مرز تیز است که خاک با مقدار رطوبت θ_i در پایین مرز را از خاک اشباع با مقدار رطوبت در بالای مرز جدا می‌کند. پس از زمان t از آغاز نفوذ، جبهه مرطوب به عمق L نفوذ می‌کند و آب تا عمق کم h_0 روی سطح خاک جمع می‌شود. معادلات نفوذ در این روش به‌صورت زیر است:

$$F(t) = kt + \Delta\theta\psi \ln[1+\frac{F(t)}{\Delta\theta\psi}] \qquad (۲۲)$$

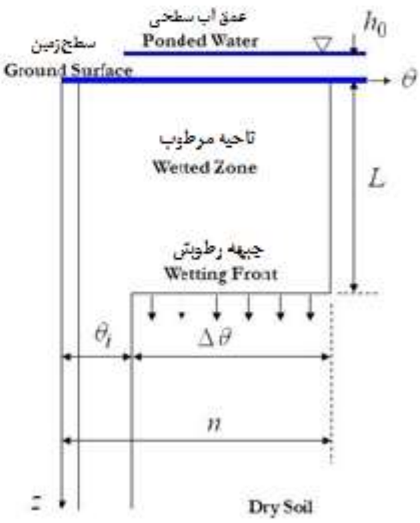
$$f = -k[1+\frac{\Delta\theta\psi}{F}] \qquad (۲۳)$$

که $\Delta\theta=\eta-\theta_i$، θ_i درصد رطوبت اولیه، η تخلخل خاک، f سرعت نفوذ (سانتیمتر بر ساعت)، F نفوذ تجمعی (سانتی‌متر)، t زمان (ساعت)، k هدایت هیدرولیکی غیراشباع (سانتی‌متر بر ساعت) و ψ مکش رطوبتی خاک (سانتی‌متر) هستند. علامت منفی به این دلیل است که جهت جریان به سمت پایین است. قابل ذکر است که اگر عمق آب بر روی سطح خاک قابل اغماض نباشد، مقدار $\psi+h_0$ جایگزین ψ در معادلات می‌شود.

مدل عددی روندیابی معکوس

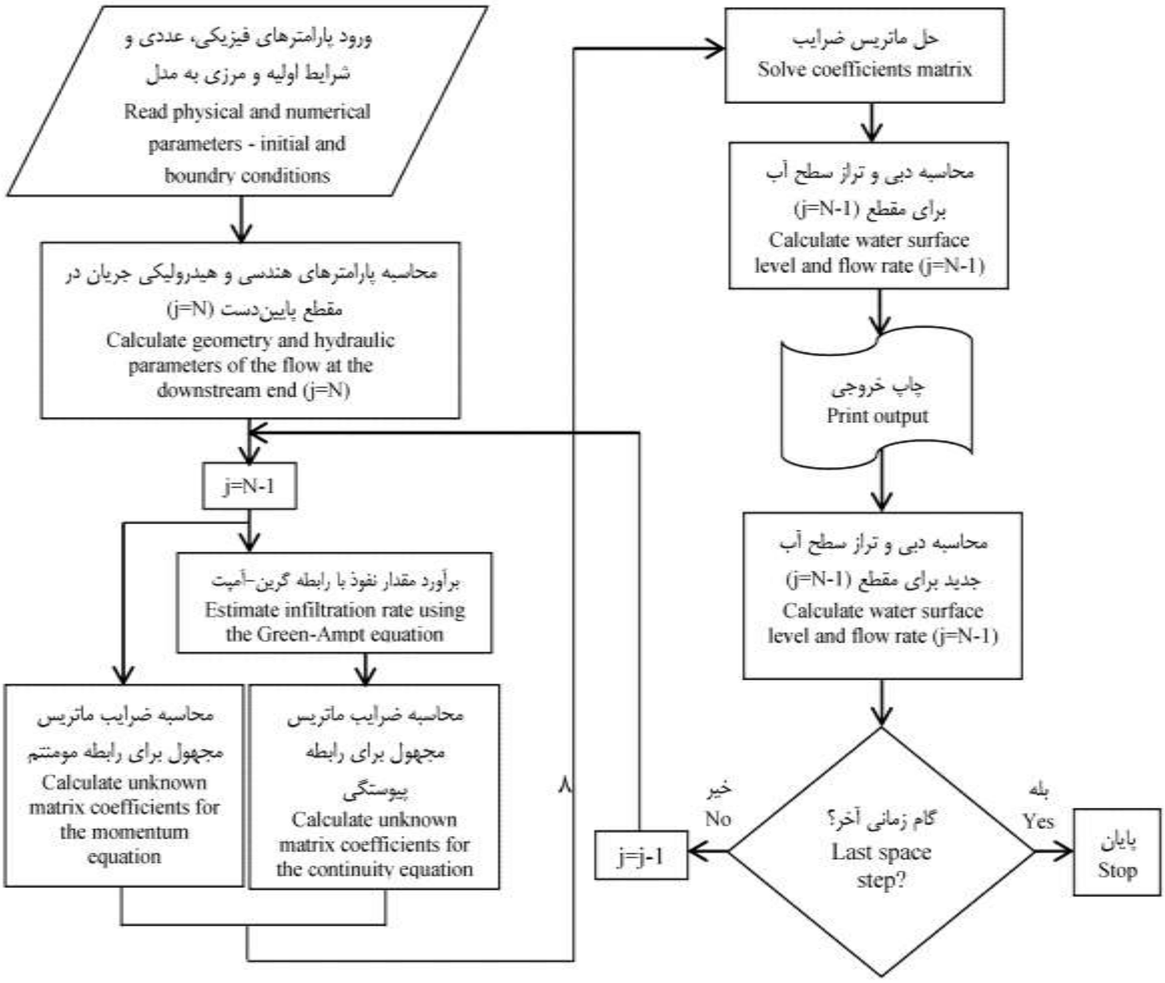
در تحقیق حاضر، برنامه‌های مجزایی در محیط نرم افزار متلب ۲۰۱۳ جهت روندیابی هیدرولیکی معکوس سیلاب به روش موج سینماتیکی و دینامیکی تهیه شد. در این مدل‌های عددی با ترکیب رابطه نفوذ گرین- آمپت با معادله پیوستگی، مجهولات عمق و دبی جریان در مکان‌ها و زمان‌های مختلف محاسبه می‌شود. همچنین دو مدل مذکور قابلیت تغییر پارامترهای عددی و فیزیکی (پارامترهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه و پارامترهای معادلات نفوذ) را در خود دارند و با دریافت این پارامترها به‌همراه هیدروگراف پایین‌دست جریان به‌عنوان ورودی، هیدروگراف جریان (مقادیر عمق و دبی جریان) را در انتهای بالادست رودخانه تولید می‌کنند. روند نمای نحوه انجام محاسبات در مدل معکوس روندیابی دینامیکی سیلاب در شکل شماره (۵) نشان داده شده است.

جهت صحت سنجی نتایج مدل عددی توسعه یافته و بررسی قابلیت کاربرد آن، از مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده یکی هیدروگراف معروف لین (۱۰) و دیگری هیدروگراف حاصل از مدل آزمایشگاهی-صحرائی بمبئی چی (۴) استفاده شده است که در شکل‌های ۶ تا ۸ مقطع تیپ مجرا یا رودخانه به‌همراه هیدروگراف‌های مشاهداتی نشان داده شده است. سری زمانی داده-های اندازه گیری شده در مقاطع بالادست و پایین‌دست و همچنین داده‌های ورودی به مدل عددی شامل خصوصیات هندسی و هیدرولیکی و خصوصیات خاک بستر نیز، به‌ترتیب در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.



شکل ۴- متغیرهای موثر در مدل نفوذ گرین- آمپت

Figure 4- Effective variables in Green-Ampt infiltration model



شکل ۵- روند نمای مدل معکوس روندیابی دینامیکی سیلاب

Figure 5- Flowchart of reverse dynamic flood routing model

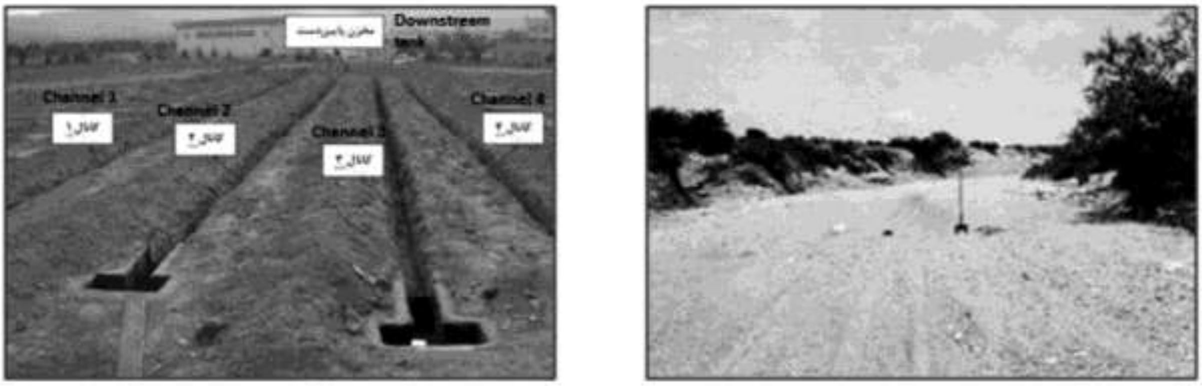
نتایج و بحث

حل معکوس معادلات سنت-ونانت، بد وضع [1] است. در روندیابی معکوس جهت حل برخلاف حالت روندیابی مستقیم، در راستای تقویت موج پیش می‌رود و به این علت هرگونه خطا در مقادیر تراز سطح آب یا دبی جریان در طول محاسبات تشدید شده و منجر به ناپایداری در حل می‌شود (۱۲). این ناپایداری عددی با ورود ترم نفوذ به معادله پیوستگی شدیدتر هم می‌شود.

لذا در ابتدا نیاز است بازه مناسب پارامترهای وزنی شمای پرایسمن و گام‌های زمانی و مکانی طوری انتخاب شوند که مدل عددی علاوه بر همگرا بودن، هیدروگراف بالادست جریان را با دقت مطلوبی به‌دست آورد. بدین منظور بعد از تهیه مدل عددی روندیابی معکوس و با استفاده از داده‌ها و یا هیدروگراف‌های مشاهداتی موجود آزمایش‌های عددی متعددی صورت پذیرفت تا گام زمانی و مکانی و محدوده مناسب پارامترهای وزنی ورودی به مدل جهت صحت سنجی آن استخراج شود.

برای تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی، با انجام آزمایش‌های عددی متعدد، بازه‌های پایداری مدل عددی در روندیابی معکوس سینماتیکی و دینامیکی بازای تغییر پارامترهای وزنی مدل یعنی θ و φ به‌دست آمد. در مواردی که به‌ازای ترکیب‌های مختلف پارامترهای وزنی، محاسبات قبل از رسیدن به مقطع بالادست واگرا شده و یا هیدروگراف خروجی بالادست دارای نوسانات مشخصی باشد آن ترکیب به عنوان بازه ناپایدار مدل روندیابی هیدرولیکی معکوس درنظر گرفته می‌شود. شکل‌های ۷ و ۸ نمونه‌ای از این ناپایداری‌ها را نشان می‌دهد که به علت انتخاب نامناسب پارامترهای وزنی، روندیابی معکوس با شکست مواجه شده است.

1- Ill-posed



(الف) (ب)

شکل ۶- مقطع تیپ رودخانه یا مجرا در زمان اندازه‌گیری، الف) رودخانه فصلی هاگز واش (داده‌های لین) و (ب) مجموعه آزمایشگاهی - میدانی (داده‌های بمبئی‌چی)

Figure 6- Typical channel or river cross section, (a) Hughes Wash river (Lane data), (b) field-experimental model (Bambeichi Data)

نوسانات ایجاد شده در نتایج آنقدر شدید است که در برخی از آزمون‌های عددی، برای دبی و تراز سطح آب مقادیر منفی حاصل و باعث واگرا شدن مدل روندیابی معکوس می‌شود.

نتایج این قسمت از آزمایش‌های عددی نشان داد که مساله معکوس برای مقادیر مشابه پارامترهای وزنی که برای روندیابی مستقیم مناسب است، قابل حل نیست، یعنی بازای مقادیر $0.5 \leq \theta \leq 1.0$ و $\varphi = 0.5$. دلیل این تفاوت، چرخش ۹۰ درجه‌ای راستای حل معادلات سنت – ونانت در روندیابی معکوس می‌باشد (شکل ۲ و ۳ مشاهده گردد). در شمای پرایسمن بکار برده شده در روندیابی مستقیم پارامتر θ به‌عنوان پارامتر ضمنی‌ساز و باعث ایجاد اتلاف در محاسبات است. در مساله معکوس عملکرد پارامترهای وزنی برعکس بوده، بنابراین پارامتر φ به‌عنوان ضمنی‌ساز شمای عددی تعریف می‌شود، پس حل پایدار برای $0.5 \leq \varphi \leq 1.0$ حاصل می‌گردد. همچنین مشخص گردید هرچه مقدار φ به یک نزدیک‌تر باشد، اتلاف شما افزایش می‌یابد که باعث حذف نوسانات شده و حلی پایدار را تضمین می‌نماید. در نهایت بازه‌های پایداری مدل هیدرولیکی معکوس برای داده‌های مشاهداتی موجود، در روندیابی سینماتیکی مقادیر $0 \leq \theta \leq 0.5$ و $0.5 \leq \varphi \leq 1.0$ و در روندیابی دینامیکی $0.3 \leq \theta \leq 0.6$ و $0.6 \leq \varphi \leq 1.0$ به‌دست آمد که با نتایج تحقیقات شیمکوویچ (۲۸ و ۲۹) که بازه پایداری مدل روندیابی معکوس را $\varphi \geq 0.5$ و $\theta \leq 0.5$ تعیین نمود، تطابق مناسبی دارد.

شایان ذکر است در روندیابی معکوس دینامیکی به‌علت پیچیدگی و غیرخطی بودن روابط، شدت نوسانات و ناپایداری‌ها نسبت به موج سینماتیک بیش‌تر است. در نتیجه، بازه پایداری پارامترهای وزنی مدل عددی در موج دینامیکی محدودتر است. جهت تعیین مقادیر مناسب گام زمانی و مکانی ورودی به مدل عددی و بالا رفتن دقت محاسبات، سعی بر آن شد عدد کورانت - نسبت سرعت انتشار حل تحلیلی به سرعت انتشار حل عددی- نزدیک به یک باشد. لذا Δx و Δt برای هیدروگراف بمبئی چی به‌ترتیب ۳ متر و ۵ ثانیه و برای هیدروگراف لین به‌ترتیب ۵۰ متر و ۲۰ ثانیه درنظر گرفته شد.

مقادیر کوچک‌تر برای این دو پارامتر علاوه بر افزایش زمان انجام محاسبات، تاثیر محسوسی در بهبود دقت در تخمین هیدروگراف بالادست ندارد.

در هنگام وقوع سیل در خشک‌رودها، کاهش حجم سیلاب در طول مسیر قابل توجه بوده و نیاز است مقدار این تلفات در روندیابی سیلاب اعمال شود. لذا برای نشان دادن اهمیت موضوع در ابتدا مدل‌های عددی توسعه یافته برای داده‌های موجود و در حالت نفوذ صفر $q_L=0$ اجرا شد که خروجی‌های مدل در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شد. در این شکل‌ها هیدروگراف ورودی یا بالادست به‌دست آمده از روندیابی معکوس دینامیکی در هیچ‌یک از سری داده‌های در دسترس، با هیدروگراف‌های مشاهداتی تطابق مناسبی نداشته است؛ طوری‌که دبی اوج هیدروگراف بالادست در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد کمتر از حالت واقعی برآورد شده است.

جدول ۱- سری زمانی هیدروگراف‌های مشاهداتی

Table 1- Time series of observational hydrographs

هیدروگراف لین Lane Hydrograph				هیدروگراف بمبئی چی Bambeichi Hydrograph			
زمان ورودی Inflow Time (Sec)	دبی ورودی Inflow Rate (m^3/s)	زمان خروجی Outflow Time (Sec)	دبی خروجی Outflow Rate (m^3/s)	زمان ورودی Inflow Time (Sec)	دبی ورودی Inflow Rate (L/s)	زمان خروجی Outflow Time (Sec)	دبی خروجی Outflow Rate (L/s)
0	0	0	0	0	0	0	0
996	0	3692	0	4	4.3	75	1.2
1117	3.5	3765	4.6	7	11.8	72	8.7
1190	5.9	3814	8.3	11	17.6	75	13.9
1360	14.7	3960	18.4	18	29.2	86	18.5
1652	22.6	4081	18.9	25	34.7	93	21.1
1895	28.4	4300	18.2	32	39	100	24.0
1919	29.2	4445	15.9	43	41.9	118	31.5
2089	30.9	4640	13.6	54	43.4	136	33.8
2162	31.1	4785	12.2	86	43.1	151	33.8
2429	27.7	5247	8.5	108	42.8	161	32.9
2721	19	5490	7	143	35.3	208	21.7
3012	13.8	5709	5.8	154	23.7	240	14.5
3644	5.3	6291	3.4	190	16.5	301	9.5
4057	1.1	6534	2.7	226	11.6	394	5.5
4178	2.1	6972	1.6	283	7.5	559	2.3
4543	2.9	7190	1.3	373	5.2	681	1.4
5563	1.5	7360	0.7	530	2.3	796	0.5
5903	0.6	8696	0	746	1.4	889	0.2
7506	0	10737	0	946	0	953	0

با محاسبه حجم زیر نمودار هیدروگراف‌های حاصل، حجم هیدروگراف روندیابی شده بالادست در حدود ۴۰ درصد کمتر از حجم سیلاب واقعی به‌دست می‌آید که بیان‌گر آن است که برای بررسی طغیان یا فروکش کردن سیلاب باید میزان نفوذ از بدنه رودخانه نیز در فرآیند روندیابی معکوس وارد شود تا بتوان با انجام محاسبات هیدرولیکی دقیق‌تر، تراز آب یا دبی جریان را در نقاط موردنیاز به‌دست آورد.

در مرحله بعد با وارد کردن ترم نفوذ از طریق رابطه گرین- آمپت در مدل و با انتخاب پارامترهای وزنی در محدوده‌های پایدار، دقت مدل‌های عددی در روندیابی معکوس سینماتیکی و دینامیکی بررسی شد. از آنجا که مسیل‌ها قبل از وقوع سیلاب خشک بوده‌اند بنابراین درنظر گرفتن عمق جریان یا دبی برابر با صفر به‌عنوان شرط اولیه مدل، باعث واگرا شدن آن در شروع محاسبات می‌شود. لذا برای جلوگیری از کاهش دقت مدل و واگرا شدن آن، عمق جریان در تمام طول مجرا برابر یک سانتی‌متر به‌عنوان شرط اولیه درنظر گرفته شده است.

هیدروگراف‌های خروجی مدل عددی در مقطع بالادست در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. به‌منظور بررسی میزان کارایی مدل عددی در تخمین هیدروگراف بالادست از شاخص‌های میزان خطای نسبی و ضریب نش- ساتکلیف استفاده شد:

$$RE\,(\%) = \left|1 - \frac{f_{ic}}{f_{io}}\right| \times 100 \quad (۲۴)$$

$$NS = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{io} - Q_{ic}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{io} - \overline{Q}_{io}\right)^2}\right) \quad (۲۵)$$

که f_{ic} مقدار دبی اوج، زمان اوج و حجم هیدروگراف بالادست محاسباتی، f_{io} مقادیر مشاهداتی این پارامترها، Q_{io} , $\overline{Q}_{io}$ به‌ترتیب دبی اوج و دبی متوسط هیدروگراف مشاهداتی و Q_{ic} دبی اوج در هیدروگراف محاسباتی است.

در مواردی که طراحی سازه‌های مرتبط با فعالیت‌های مهندسی رودخانه مدنظر است، مقادیر دبی حداکثر سیلاب اهمیت پیدا می‌کند. همچنین حجم زیر هیدروگراف که معرف حجم سیلاب می‌باشد در تعیین حجم مخازن ذخیره و همچنین محاسبه میزان تلفات جریان در

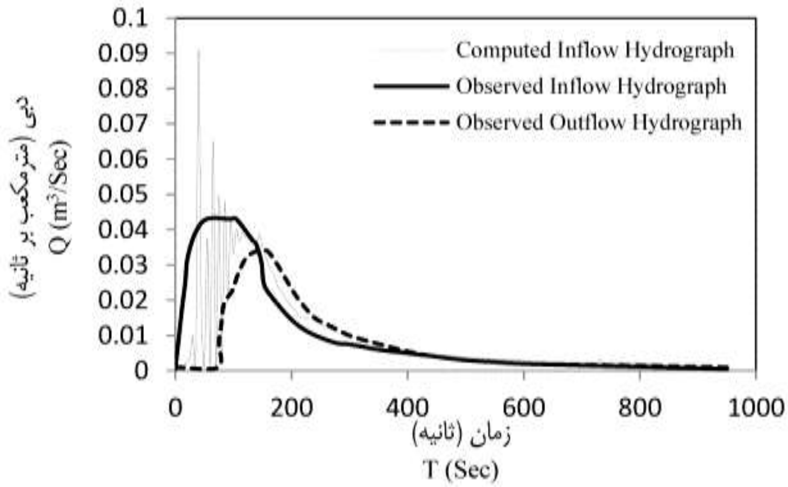
بازه عبوری از رودخانه کاربرد دارد.

در جدول ۳ و ۴ مقادیر دبی اوج، زمان دبی اوج، حجم هیدروگراف‌ها و پارامترهای آماری حاصل از روابط ۲۴ و ۲۵ آورده شده است. هرچه درصد خطای نسبی کمتر و معیار نش- ساتکلیف به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تطابق بهتر خروجی مدل عددی با داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد.

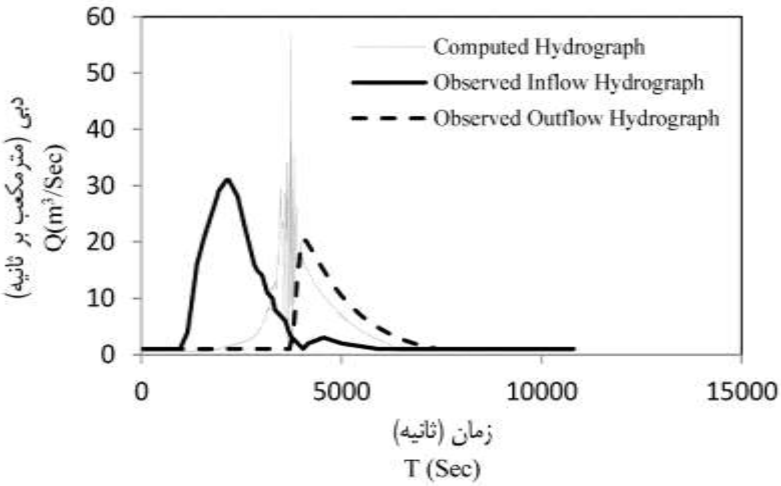
همان‌طور که از نتایج مشخص است هر دو مدل روندیابی معکوس هیدرولیکی استفاده شده با اعمال ترم نفوذ در معادلات، با دقت مناسبی هیدروگراف بالادست را روندیابی نمودند. نتایج حاصل از داده‌های هیدروگراف بمبئی چی (هیدروگراف اول) دارای دقت بیشتری نسبت به هیدروگراف لین (هیدروگراف دوم) است. به‌عنوان مثال دبی اوج محاسبه شده به روش موج دینامیکی برای داده‌های هیدروگراف دوم دارای ۷ درصد خطا نسبت به مقدار مشاهده‌ای آن است در صورتی‌که برای داده‌های هیدروگراف اول خطای نسبی ۲ درصد به‌دست آمده است.

جدول ۲- داده های استفاده شده در مدل عددی (۴ و ۲۰)
Table 2- Data used in the numerical model (4, 20)

پارامترهای ورودی Input Parameters		(لین) (Lane)	(بمبئی چی) (Bambeichi)
		نوع هیدروگراف Hydrograph Type	
مجرا Channel	طول Length (m)	6400	38
	عرض Width (m)	11	0.5
	شیب جانبی Side Slope	0	0
	ضریب مانینگ Manning’s Coefficient	0.035	0.25
	شیب کف Bed Slope	0.012	0.006
خاک Soil	K (m/s)	4.2×10^{-5}	1.1×10^{-5}
	Ψ (m)	0.0012	6.72
	$\Delta\theta$	0.256	0.27

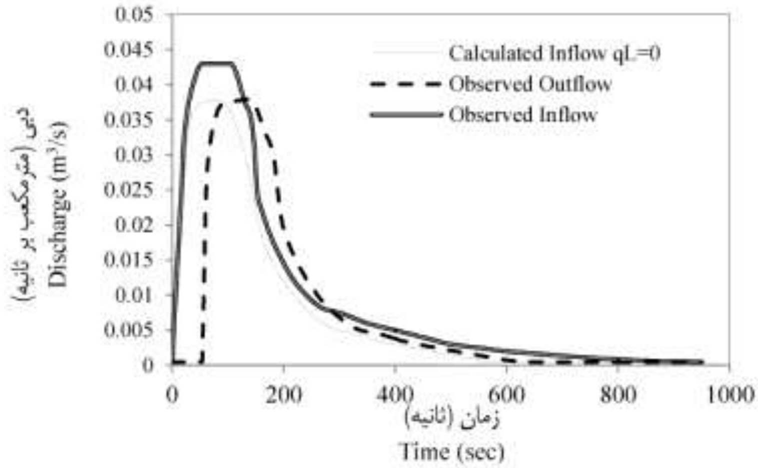


شکل ۷- مثالی از ناپایداری مدل عددی روندیابی معکوس بازای θ=0.8 و φ=0.6- هیدروگراف بمبئی چی
Figure 7- An example of the reverse model instability for θ=0.8 , φ=0.6- Bambeichi hydrograph



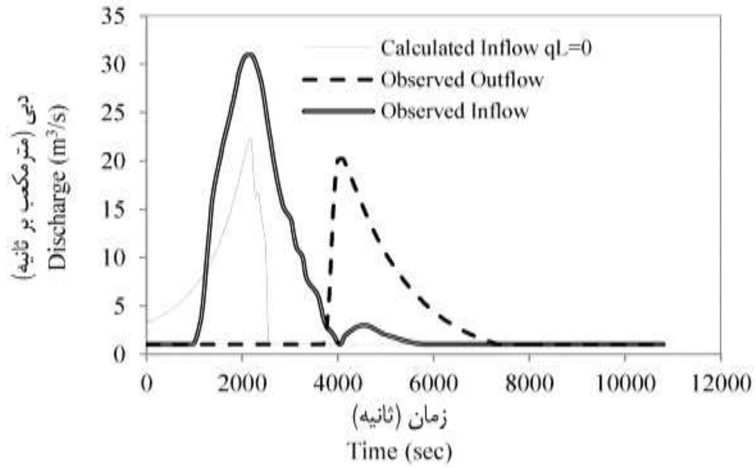
شکل ۸- مثالی از ناپایداری مدل عددی روندیابی معکوس بازای θ=0.8 و φ=0.6- هیدروگراف لین

Figure 8- An example of the reverse model instability for θ=0.8 , φ=0.6- Lane hydrograph



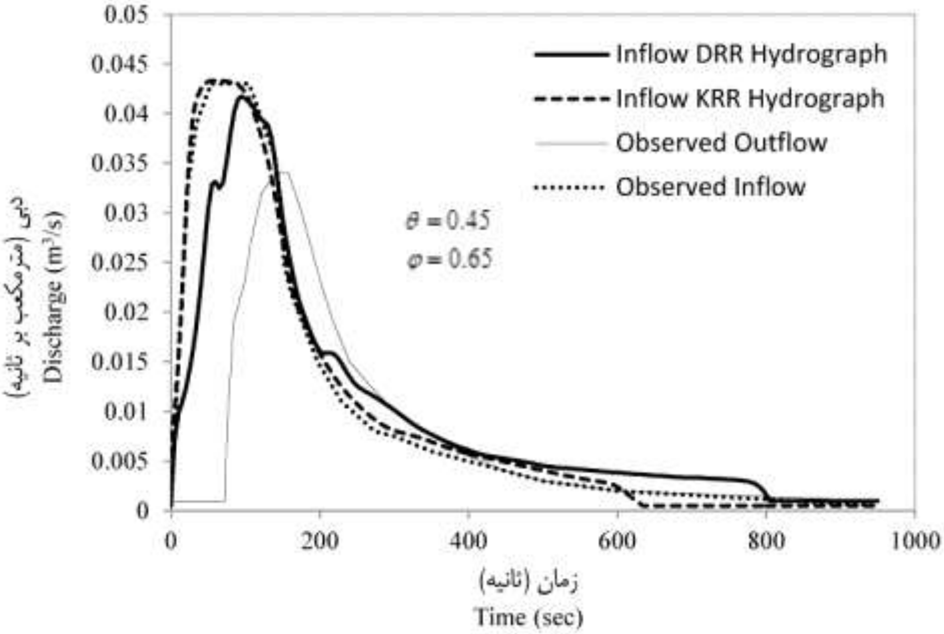
شکل ۹- خروجی مدل روندیابی معکوس دینامیکی بدون منظور کردن نفوذ - هیدروگراف بمبئی چی

Figure 9- Output of dynamic reverse routing model without applying infiltration - Bambeichi hydrograph



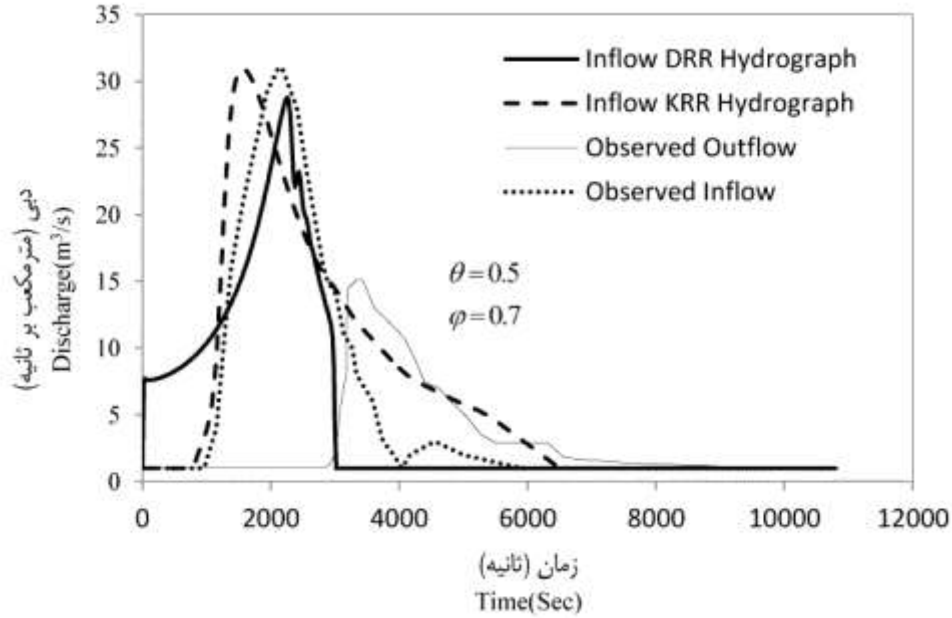
شکل ۱۰- خروجی مدل روندیابی معکوس دینامیکی بدون منظور کردن نفوذ- هیدروگراف لین

Figure 10- Output of dynamic reverse routing model without applying infiltration- Lane hydrograph



شکل ۱۱- مقایسه هیدروگراف بالادست روندیابی شده در مطالعه حاضر با هیدروگراف بمبئی چی

Figure 11- Comparison of the inflow hydrograph obtained in the present study with Lane hydrograph



شکل ۱۲- مقایسه هیدروگراف بالادست روندیابی شده در مطالعه حاضر با هیدروگراف لین

Figure 12- Comparison of the inflow hydrograph obtained in the present study with Lane hydrograph

مقدار ضریب نش- ساتکلیف نیز برای هیدروگراف اول ۰/۸۹ محاسبه گردید که بیان‌گر دقت بالاتر خروجی مدل عددی نسبت به هیدروگراف دوم با ضریب ۰/۸۲ می‌باشد. در مورد زمان اوج، بیشترین مقدار خطا مربوط به روندیابی معکوس سینماتیکی داده‌های هیدروگراف اول و به مقدار ۱۵ درصد است.

همان‌طور که در قبل ذکر شد و بر اساس شکل‌های ۱۱ و ۱۲، دقت مدل عددی روندیابی معکوس در شبیه‌سازی هیدروگراف بالادست برای هیدروگراف اول (بمبئی چی) نسبت به هیدروگراف دوم بالاتر است که یکی از دلایل اصلی آن طول کوتاه بازه بین بالادست و پایین دست جریان است (جدول ۲). طی آزمایش‌های عددی که در

این مطالعه انجام شد، مشاهده گردید که با افزایش طول بازه، احتمال ایجاد ناپایداری و یا خطا در محاسبات بیش‌تر می‌شود.

بعنوان مثال با افزایش طول بازه روندیابی معکوس سیلاب در داده‌های هیدروگراف لین، محاسبات در روندیابی سینماتیکی حداکثر تا طول ۱۵ کیلومتر و در روندیابی دینامیکی تا طول ۸ کیلومتر به سمت بالادست جریان دارای پایداری عددی بود که به علت ساده‌سازی صورت گرفته در معادلات روندیابی سینماتیک، هیدروگراف در طول بیش‌تری در جهت بالادست جریان روندیابی گردید.

مقدار تلفات انتقال واقعی داده‌های در دسترس با مقایسه حجم زیر نمودار هیدروگراف ورودی و خروجی مشاهده‌ای قابل برآورد است. حجم نفوذ یا تلفات انتقال برای داده‌های هیدروگراف اول و دوم به‌ترتیب ۲,۱۲ و ۲۰۰۰۰ متر مکعب است که به‌ترتیب ۲۳ و ۳۴ درصد از حجم جریان ورودی به بازه‌های رودخانه یا کانال را شامل می‌شود.

با بررسی خروجی نتایج مدل عددی و مطابق با جدول ۳ و ۴، دقت مدل‌های روندیابی معکوس در برآورد حجم هیدروگراف بالادست و در نتیجه میزان تلفات انتقال به‌ویژه برای داده‌های هیدروگراف اول مطلوب بوده و بیش‌ترین میزان خطای نسبی در برآورد تلفات باتوجه به نتایج به میزان ۲۵ درصد در مدل روندیابی معکوس سینماتیکی و داده‌های مربوط به هیدروگراف دوم به‌دست آمده است. در بین دو روش روندیابی معکوس هیدرولیکی، نتایج روش موج دینامیکی در اکثر آزمایش‌های عددی دارای دقت بالاتری بود، به این دلیل که در این روش معادلات سنت-ونانت به‌طور کامل حل می‌شوند. این اختلاف در هیدروگراف لین که معرف شرایط واقعی یک خشک‌رود می‌باشد، محسوس‌تر است (جدول ۴). به دلیل طول کوتاه مجرای مربوط به آزمایش‌های بمبئی چی، اثرات حذف ترم‌های موجود در رابطه مومنتم جریان در فرآیند روندیابی سینماتیک محسوس نبوده و باتوجه به ارقام جدول ۳، نتایج هر دو روش روندیابی معکوس تقریبا نزدیک به هم می‌باشد.

جدول ۳- دقت مدل‌های عددی روندیابی معکوس در برآورد پارامترهای شاخص در هیدروگراف بمبئی چی

Table 3- Accuracy of reverse routing numerical models in estimating determinative parameters in Bambeichi hydrograph

پارامترهای شاخص Index parameters	نوع هیدروگراف Hydrograph Type مشاهداتی Observed	مدل معکوس دینامیکی Dynamic reverse model	مدل معکوس سینماتیکی Kinematic reverse model
Qp (m^3/s)	0.043	0.042	0.0427
NS		0.89	0.94
RE (%)		2	1
t_p (hr)	0.026	0.023	0.022
RE (%)		11	15
حجم Volume (m^3)	9.1	9.4	9.31
RE (%)		3	2

جدول ۴- دقت مدل‌های عددی روندیابی معکوس در برآورد پارامترهای شاخص در هیدروگراف لین

Table 4- Accuracy of reverse routing numerical models in estimating determinative parameters in Lane hydrograph

پارامترهای شاخص Index parameters	نوع هیدروگراف Hydrograph Type مشاهداتی Observed	مدل معکوس دینامیکی Dynamic reverse model	مدل معکوس سینماتیکی Kinematic reverse model
Qp (m^3/s)	31	28.8	30.5
NS		0.82	0.84
RE (%)		7	1.5
t_p (hr)	0.61	0.63	0.53
RE (%)		3	13
حجم Volume (m^3)	55000	52000	69000
RE (%)		5.5	25

به‌طور کلی در مدل موج سینماتیک در صورت حذف اثر مقدار نفوذ بر روی حجم هیدروگراف، فرونشینی موج اتفاق نمی‌افتد و هیدروگراف پایین دست بدون تغییر شکل به مقطع بالادست منتقل می‌شود. از آن‌جا که فرونشینی امواج سیلاب در هر آبراهه به خوبی

مشهود است، در نتیجه تعیین درجه اهمیت شیب بستر نسبت به بقیه جملات معادله اندازه حرکت که در مدل موج سینماتیک حذف می‌شوند، ضروری است. با این تفاسیر می‌توان دریافت که در مجاری با شیب زیاد، اهمیت جمله S_0 از بقیه جملات بیشتر است. لذا استفاده از روش موج سینماتیک در صورت زیاد بودن شیب بستر پیشنهاد می‌شود. البته با افزایش شیب کف و در نتیجه سرعت جریان، جریان به سمت حالت فوق بحرانی تغییر کرده و در این‌حالت به دلیل حرکت یک‌طرفه موج سیلاب به سمت پایین دست و عدم انعکاس حرکت امواج به سمت بالادست جریان، روندیابی معکوس سیلاب قابل کاربرد نخواهد بود.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر دو مدل عددی موج سینماتیکی و دینامیکی توسعه یافته است که با استفاده از حل معکوس سنت-ونانت و کوپل کردن معادله نفوذ گرین- آمپت با معادله پیوستگی جریان، روندیابی معکوس سیلاب در خشک‌رودها را همزمان با برآورد نفوذ در مسیر رودخانه انجام می‌دهند. برای صحت‌سنجی مدل در شبیه سازی سیلاب خشک‌رودها از دو مجموعه داده‌های اندازه‌گیری‌شده به نام‌های هیدروگراف لین و داده‌های آزمایشگاهی- صحرایی بمبئی چی (سال ۲۰۱۲) استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل‌های عددی مذکور توانایی شبیه‌سازی معکوس جریان را در خشک‌رودها که مقدار نفوذ در آن‌ها قابل توجه است، دارا است. در مدل روندیابی معکوس هیدرولوژیکی ارائه شده توسط توکلی و همکاران (۲۷) امکان برآورد میزان نشت با استفاده از روندیابی معکوس سیل بررسی شده است ولی روش هیدرولیکی استفاده شده در تحقیق حاضر به‌علت حل کامل معادلات سنت-ونانت دارای دقت بالاتری نسبت به روش‌های هیدرولوژیکی است. همچنین معادله نشت استفاده شده در مطالعه توکلی و همکاران (۲۷) رابطه غیرخطی معروف به سینگ است که مقدار نفوذ در آن تنها تابعی از دبی جریان می‌باشد درصورتی که میزان نفوذ در خشک‌رودها علاوه بر شرایط هیدرولیکی جریان، به پارامترهای فیزیکی خاک بستر نیز وابسته است که توسط رابطه گرین – آمپت در مدل عددی حاضر درنظر گرفته شده است.

میزان دقت مدل عددی توسعه داده شده در این پژوهش، در برآورد دبی اوج هیدروگراف بالادست بالغ بر ۹۰ درصد با حداقل مقدار ضریب نش- ساتکلیف ۰/۸۲ و در محاسبه زمان اوج، دقت مدل بین ۸۵ تا ۹۷ درصد است. همچنین حجم هیدروگراف بالادست که نشان دهنده عملکرد مدل در برآورد نفوذ در مسیر جریان است با دقت ۷۵ تا ۹۸ درصد برآورد شده است. محمدی و همکاران (۲۱) با جفت کردن معادله گرین– آمپت و معادلات سنت – ونانت در روندیابی مستقیم دینامیکی، میزان تلفات نفوذ را برای داده‌های هیدروگراف لین در حدود ۳۰۰۰۰ مترمکعب برآورد نمودند که ۸۰۰۰ مترمکعب بیش‌تر از مقدار واقعی آن (۲۰۰۰۰ مترمکعب) محاسبه شده است ولی در مطالعه حاضر میزان این تلفات در روندیابی معکوس دینامیکی ۱۹۰۰۰ مترمکعب برآورد شده است که نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل عددی روندیابی هیدرولیکی معکوس می‌باشد. به دلیل رویکردهای متفاوت در محاسبه نفوذ (استفاده از روابط نفوذ در حالت اشباع و غیر اشباع خاک بستر)، روش‌های مختلف محاسبه تلفات در مدل روندیابی هیدرولیکی معکوس، می‌توانند تفاوت‌هایی را از نظر قابلیت کاربرد در روندیابی سیلاب و اثرات آن بر روی هیدروگراف خروجی مدل ایجاد کنند. این موضوع هم باید مورد توجه کاربران روندیابی معکوس باشد و هم برای تحقیقات آتی در این باره مد نظر قرار گیرد.

منابع

1- Akan A.O. 2006. Open Channel Hydraulics. Elsevier, Oxford, UK.
2- Badfar M., Barati R., Dogan E., and Tayfur G. 2021. Reverse flood routing in rivers using linear and nonlinear muskingum models. Journal of Hydrologic Engineering 26(6): 04021018.
3- Bahrami M., BoroomandNasab S., Naseri A.A., and Albaji M. 2010. Comparison of Muskingum-Cunge model and irrigation hydraulic models in estimation of furrow irrigation advance phase. Research on Crops 11(2): 541-544.
4- Bambeichi S. 2012. Estimation of transmission losses and development of an extended flood routing model for ephemeral rivers. PhD Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian with English abstract)
5- Bautista E., Clemmens A.J., and Strelkoff T. 1997. Comparison of numerical procedures for gate stroking. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 123: 129-136.
6- Boroto R.A.J., and Gorgens A.H.M. 2003. Estimating transmission losses along the Limpopo river-an overview of alternative methods. Hydrology of the Mediterranean and Semi Arid Regions. IAHs Publication 278: 138-143.
7- Bruen M., and Dooge J. 2007. Harmonic analysis of the stability of reverse routing in channels . Hydrology and Earth System Sciences Discussions 11(1): 559-568.
8- Cataldo J.C., Behr C., and Montalto F.A. 2004. A summary of published reports of transmission losses in ephemeral streams in the U.S. A Report to the National Center for Housing and Environment. 38 PP.
9- Cheng L., Wang Z., Hu S., Wang Y., Jin J., and Zhou Y. 2015. Flood routing model incorporating intensive

streambed infiltration. Science China Earth Sciences 58(5): 718-726.
10- Chow V.T., Maidment D.R., and Mays L.W. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill International Editions.
11- Das A. 2009. Reverse stream flow routing by using Muskingum models. Sadhana 34(3): 483-499.
12- Dooge J., and Bruen M. 2005. Problems in reverse routing. Acta Geophysica Polonica 53(4): 357-371.
13- D’Oria M., and Tanda M.G. 2012. Reverse flow routing in open channels: A bayesian geostatistical approach. Journal of Hydrology 460-461: 130-135.
14- Eli R.N., Wiggert J. M., and Contractor D.N. 1974. Reverse flow routing by the implicit method. Water Resourcrs Research 10(3): 597-600.
15- Fread D.L. 1973. Effects of time step size in implicit dynamic routing. Water resources bulletin. American Water Resources Association 9(2): 338-351.
16- Ghobadian R., and Khalaj M. 2012. Estimating of unsteady seepage losses in Zangemar river using mathematical model. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 3(6): 206-214. (In Persian with English abstract)
17- Heydari M., Oodi Sh., and Ahmadi Dehrashid F. 2019. Inverse flood routing based on diffusion wave model (A case study on Yuan river, China). Iranian Journal of Soil and Water Research 51(4): 1003-1012. (In Persian with English abstract)
18- Hosseini S.M., and Abrishami J. 2015. Open Channel Hydrsulics. Ferdowsi University of Mashhad Press. (In Persian)
19- Koussis A.D., Mazi K., Lykoudis S., and Argiriou A.A. 2012. Reverse flood routing with the inverted Muskingum storage routing scheme. Natural Hazards and Earth System Sciences 12(1): 217-227.
20- Lane L.J., Diskin M.H., and Reynard K.G. 1971. Input-output relationships for an ephemeral stream channel system. Journal of Hydrology 13: 22-40.
21- Mohamadi S., and Ghobadian R. 2013. Flood routing and estimating of transmission losses in ephemeral rivers (A case study: Gharesoo river). 2th National Conference on Flood Management and Engineering with an Urban Flood Approach, Tehran, Iran. (In Persian)
22- Mohamadi S., Ghobadian R., and Kashefipour S.M. 2015. Coupling Green-Ampt and Saint-Venant equations for estimating of transmission losses during flood routing in rivers. Iranian Journal of Irrigation Sciences and Engineering 39(1): 143-153. (In Persian with English abstract)
23- Morin E., Grodek T., Dahan O., Benito G., Kulls C., Jacoby Y., Langenhove G.V., Seely M., and Enzel Y. 2009. Flood routing and alluvial aquifer recharge along the ephemeral arid Kuiseb river, Namibia. Journal of Hydrology 368: 262-275.
24- Noorduijn S.L., Shanafield M., Trigg M.A., Harrington G.A., Cook P.G., and Peeters L. 2014. Estimating seepage flux from ephemeral stream channels using surface water and groundwater level data. Water Resources Research 50(2): 1474-1489.
25- Patowary S., and Sarma A.K. 2017. A modified hydrodynamic model for routing unsteady flow in a river having piedmont zone. Journal of Hydrology and Hydromechanics 65(1): 60-67.
26- Shamaa M.T., and Harkuri H.M. 2011. Implicit numerical scheme for regulating unsteady flow in open channel. 15th International Water Technology Conference. IWTC-15. Alexandria, Egypt.
27- Tavakkoli E., Zangoii M., and Barati R. 2021. Reverse flood routing in ephemeral rivers using a hydrological approach. 19th Iranian Hydraulic Conference, 15-16 Feb. 2021. Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian)
28- Szymkiewicz R. 1993. Solution of inverse problem for the saint venant equations. Journal of Hydrology, 147: 105-120.
29- Szymkiewicz R. 2008. Application of the simplified models to inverse flood routing in Upper Narew river (Poland). Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, 405: 121-135.
30- Szymkiewicz R. 2010. Numerical modeling in open channel hydraulics. Springer. New York.

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 6, Feb.-Mar. 2022, p. 805-822

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۴۰۰، ص. ۸۲۲-۸۰۵

Development of Reverse Hydraulic Flood Routing Method in Ephemeral Rivers Considering Infiltration Rate

A.A. Khosravi[1*]- A. Parvaresh Rizi[2]- R. Barati[3]

Received: 04-12-2021
Accepted: 05-01-2022

Introduction: In many cases, after a flood, some information is needed about the flood characteristics at the upstream of a specific location where there is no hydrometric station on the river or flow discharge, and water surface level was not measured at the time of the flood. In reverse flood routing, calculations are performed from the downstream section step by step to the upstream section of the river and inlet hydrograph is produced based on river hydraulic characteristics and downstream hydrograph. During floods in rivers, the volume of floods gradually decreases due to infiltration into the bed and sides. This reduction in flood volume, called transmission losses, is significant in arid areas. Therefore, developed models for flood routing in seasonal rivers in arid and semi-arid regions should provide an appropriate estimate of transmission losses. In the routing process, the governing equations are combined with an equation to account for infiltration or seepage losses into the riverbed or canal. Then, by routing the flood along the interval and examining the resulting hydrographs at different points, the amount of transmission losses is determined. In the present study, which deals with the reverse hydraulic routing of floods in arid areas, the infiltration losses along the river estimated by the Green-Ampt relationship was considered in numerical models so as to perform reverse flood routing with appropriate accuracy and under hydraulic conditions of ephemeral rivers. To the best of our knowledge, so far no study has analyzed transmission losses in reverse hydraulic flood routing.

Materials and Methods: The equations governing gradual variable flows are known as the Saint-Venant equations, which include the continuity and the momentum equations. In hydraulic flow routing models, the complete form of the continuity equation is used, but the momentum equation is applied in various forms obtained by removing some components. The simplest hydraulic routing model is the kinematic wave model in which the components related to inertial forces and pressure force in the momentum equation are omitted. In the diffusion wave model, the components related to inertial forces are omitted, but the pressure force is taken into account and finally, in the dynamic wave model, the momentum equation is considered completely without simplification. In the present study, separate programs were prepared in MATLAB 2013 software for reverse hydraulic flood routing by Kinematic and dynamic wave methods. In these numerical models, by coupling the Green-Ampt infiltration equation with the continuity equation, the depth and flow rate in different places and times are calculated in the upstream direction of the flow.

Results and Discussion: In order to validate the results of the developed numerical models and to evaluate its applicability, a set of measured data known as Lane hydrograph and Bambeichi hydrograph was used. The results showed that both reverse hydraulic flood routing models produced the upstream hydrograph with appropriate accuracy. The results of the Bambeichi hydrograph data were more accurate than the Lane hydrograph due to its shorter length of the interval between upstream and downstream sections. For example, the peak discharge of inlet hydrograph calculated by the dynamic wave method for the Lane hydrograph data had an error of 7% compared to the observed value, while the error obtained for Bambeichi hydrograph data was 2%. Therefore, the accuracy of inverse routing models in estimating the volume of upstream hydrograph and consequently the amount of transmission losses was desirable especially for the Bambeichi hydrograph data. The highest error in estimating losses was 25% for the reverse kinematic model and the data related to the Lane hydrograph.

Between the two reverse hydraulic flood routing methods, the performance of the dynamic wave method was more accurate for the most numerical experiments, as the governing equations are completely solved in this method. This difference is more pronounced in the Lane hydrograph, which represents the actual conditions of

1 and 2- Ph.D. Candidate and Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: Ali.a.khosravi@ut.ac.ir)
3- Ph.D. in Civil Engineering, Head of Applied Research Group, Khorasan Razavi Water Authority
DOI: 10.22067/JSW.2022.73670.1116

an ephemeral river.

Conclusion: The accuracy of the developed numerical models was 90% in estimating the peak flow rate of the upstream hydrograph, and between 85% and 97% in estimating the time related to this discharge. The volume of the upstream hydrograph, which indicates the model performance in estimating the infiltration in the flow path, was also modeled with 75 to 98% accuracy. These results show that the numerical models simulate reverse flood routing with acceptable accuracy in ephemeral rivers, where transmission or seepage losses are significant. Due to different approaches in calculating infiltration losses, these methods can make differences for the hydrograph output of numerical models.

Keywords: Green-Ampt equation, Infiltration rate, Numerical model instability, Reverse routing, Step by step calculations